

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

УДК 621.315.592

ФІЗИКА ГРАФЕНУ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

М. В. Стріха

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
Київський національний університет ім. Тараса Шевченка.
maksym_strikha@hotmail.com

ФІЗИКА ГРАФЕНУ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

М. В. Стріха

Анотація. Дано стислий огляд результатів, отриманих під час вивчення графену — моноатомного шару вуглецю з гексагональною двовимірною ґраткою, наділеного низкою унікальних фізичних властивостей. Особливу увагу звернено на перспективи застосування графену в електроніці, зокрема в сенсорах.

Ключові слова: вуглець, графен, рухливість заряду, електронний газ, квантово-розмірний ефект

PHYSICS OF GRAPHENE: STATUS AND PERSPECTIVES

М. V. Strikha

Abstract. A short review of results, obtained within the examination of graphene — monoatomic carbon layer with two-dimension hexagonal lattice, characterized by the unique physical properties, is presented. Special impact is made on the perspectives of graphene applications in electronics, especially in sensors.

Keywords: carbon, graphene, mobility of the charge, electron gas, quantum-dimensional effect

ФИЗИКА ГРАФЕНА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

М. В. Стріха

Аннотация. Представлен сжатый обзор результатов, полученных во время изучения графена — моноатомного слоя углерода с гексагональной двумерной решеткой, обладающего рядом уникальных физических свойств. Особое внимание уделяется перспективе применения графена в электронике, в частности в сенсорах.

Ключевые слова: углерод, графен, подвижность заряда, электронный газ, квантово-размерный эффект

Графен — новий двовимірний матеріал

Вперше зразки графену — моноатомного шару вуглецю, запакованого в гексагональну ґратку — було отримано й досліджено в 2004 році в Центрі мезоскопії й нанотехнологій Манчестерського університету (Велика Британія) [1] групою на чолі з Андрієм Геймом, основу якої складали російські вчені. Вигляд графену в електронному мікроскопі зображено на рис. 1. Відтоді розпочався справжній бум робіт, присвячених графенові (див. напр. огляди [2,3]). Говорять про появу “фізики графену” — нової інтердисциплінарної області досліджень на стикові фізики конденсованого середовища, фізики високих енергій і матеріалознавства.

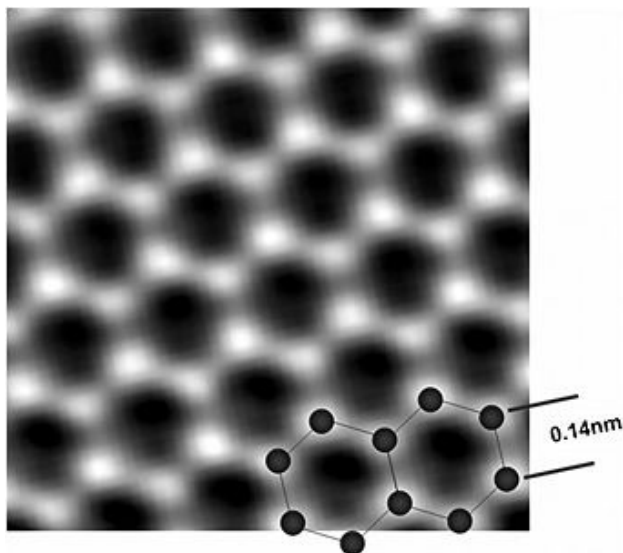


Рис. 1. Графен — вигляд в електронному мікроскопі.

На те є щонайменше дві причини.

По-перше, надто вже нетривіальні результати було отримано впродовж останніх років на цьому напівметалі (чи безщільному напівпровідникові), який виявився багатий на цілком унікальні фізичні характеристики. Причому йдеться не лише про значно вищу від сталі механічну жорсткість (модуль Юнга становить ~ 1 ТПа) чи про дуже високу теплопровідність $\sim 5 \times 10^3$ Вт·м $^{-1}$ ·К $^{-1}$. Найбільш приголомшливою властивістю нового матеріалу є те, що, на відміну від усіх інших відомих науці твердих тіл, електрони і дірки (ферміони!) мають у графені лінійний за імпульсом (а не квадратичний, як це має впливати з рівняння Шредінгера) енергетичний спектр. Такий спектр досі вважали притаманним лише для квазірелятивістських бозонів — фотонів і нейтрино.

По-друге, ці незвичайні ферміони мають дуже високу рухливість (теоретична верхня межа становить 2×10^6 см 2 ·В $^{-1}$ ·с $^{-1}$, що на чотири порядки перевищує рухливість носіїв у кремнії — основному матеріалі сучасної електроніки).

Як відомо, основним елементом електроніки сьогодні залишається транзистор метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) із ізольованим затвором. Гранична частота роботи такого транзистора f_t пов'язана з рухливістю носіїв μ і довжиною каналу d простим співвідношенням $f_t \sim \mu / d$. Протягом останніх 40 років швидкодію транзисторів підвищували зменшенням розмірів каналу (досягнуто робочі величини в кілька десятків нанометрів) [4]. Проте тут, схоже, досягли принципової межі, пов'язаної з наявністю короткоканальних ефектів [4], і тому дальший поступ пов'язують із застосуванням нових матеріалів зі значно більшою, аніж у кремнії, рухливістю. Графен, на думку окремих експертів, може виявитися ідеальним кандидатом на таку роль.

Очевидно, на основі графену можуть бути створені також газові та біо-сенсори, світлодіоди та інші пристрої. А поява повідомлення про те, що вдалося виростити графеновий сенсорний екран з діагоналлю в 75 см [5] (шість років тому все починалося зі зразків мікронного розміру) відразу ж призвела до оптимістичної заяви першовідкривача графену А.Гейма про те, що за пару років з'являться пристрої побутової електроніки на основі графену.

Отримання графену

В певному сенсі графен було отримано задовго до 2004 року. Адже площини графену, пов'язані слабкими Ван-дер-Ваальсовими зв'язками, утворюють такий давно відомий людині кристал, як графіт (рис. 2). (Навіть саме слово “графен” вигадали ще у 1987-му на позначення однієї з площин, що творять графіт). А тому кожний художник, проводячи по папері олівцем, створював і мікроплощинки, де залишався усього кілька-, а то й одноатомний шар вуглецю. Проте реально дослідити двовимірний (2D) вуглець (а тим більше — підвести до нього електричні контакти) дозволило лише створення в 1980-х атомного силового мікроскопу і розвиток нанотехнологій.

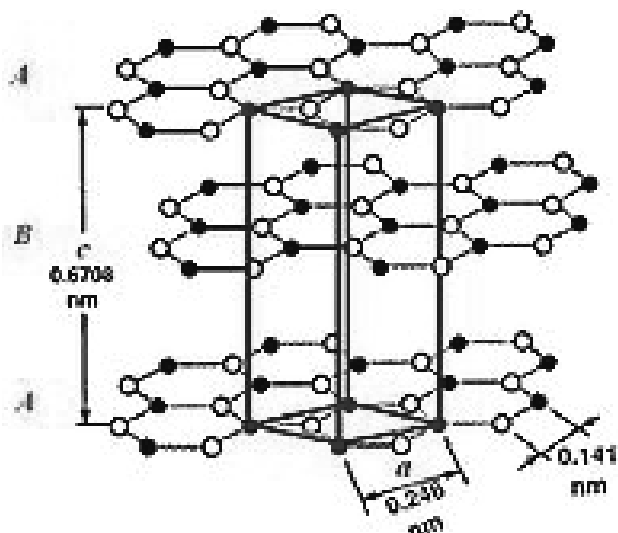


Рис. 2. Графіт (α -модифікація). Кристал графіту складається з площин графену, утримуваних слабкими Ван-дер-Ваальсовими силами.

У 1980-ті спершу було отримано не 2D вуглець — графен, а 1D структури — вуглецеві нанотрубки, і 0D фулерен — молекулу C_{60} . І це не дивно — адже ще в 1930-ті Р.Пайерлсом і Л.Ландау теоретично було показано, що ідеальну двовимірну плівку отримати неможливо через її нестабільність щодо згортання або скручування [6]. І однак група А.Гейма знайшла вихід: графен було отримано не у вільному стані, а закріпленим на діелектричній підкладці!

Примітивну технологію перших робіт з отримання графену було названо “методом відлущування” (англ. “exfoliation”). До зразка графіту прикладали звичайний скотч. Потім його обережно віддирали — з налипшими фрагментами графіту, які в окремих місцях могли мати одноатомну товщину. Потім скотч притискали до підкладки (зараз у ролі підкладки найчастіше використовують шар діелектрика SiO_2). Далі скотч усували хімічними методами — а закріплений на підкладці вуглець залишався. З допомогою оптичного мікроскопу (одноатомний шар вуглецю можна бачити! — про це ми поговоримо згодом) визначали ті фрагменти підкладки, на яких залишався моноатомний шар (вони мали розмір до 10 мікронів). Потім залишалася ювелірна робота підведення електричних контактів (це роблять методом електронної літографії й реактивного плазмового травлення).

В цілому у вертикальному розрізі отримана структура здебільшого має вигляд: шар графену, потім шар діелектрика SiO_2 завтовшки як

правило в 300 нм (він закріплює графен і водночас електрично ізолює його); і, нарешті, під ним напівпровідник кремній, який виконує роль електричного затвора: подаючи на нього позитивний чи негативний заряд, можна отримувати графен з електронною чи з дірковою провідністю.

Така технологія має очевидні недоліки: неможливо отримати плівку визначеного розміру й форми у визначеному наперед місці підкладки. Вартість перших зразків графену була астрономічна — порядку 100 000 000 \$/см². Проте саме ця примітивна й витратна технологія дозволила отримати революційні результати у фізиці конденсованого середовища.

Майже відразу розпочалися спроби удосконалення технології вироблення графену. Найбільш ефективним і придатним для промислового виробництва виявився метод, в основі якого є плазмохімічне осаджування з газової фази. Завдяки цьому методі у 2009 графен уже виробляли в світі тоннами, а його вартість знизилася до 100 \$/см².

Нарешті, справді проривний ефект мала робота [5]. Хіміки з Японії та Південної Кореї вирощували графен на великих площах мідної фольги осаджуванням з парової фази. Потім отримані мідно-графенові аркуші пропускали крізь валик, наносячи на них шар спеціального високоадгезивного полімеру. На наступному етапі мідь витравлювали, а графен з полімером також з допомогою валика наносили на кінцеву підкладку. На кінцевому етапі полімер усували нагріванням — і отримували листи графену на підкладці з діагоналлю в 75 см.

Отримані аркуші було використано в сенсорному дисплеї, який, за висновками дослідників, не поступався стандартним дисплеєм, створеним на основі провідних шарів з індієво-олов'яних оксидів.

Хімічні зв'язки

Атом вуглецю має шість електронів, розподілених між орбіталами як $1s^2 2s^2 2p^2$. Внутрішні $1s$ електрони інертні й не беруть участі у формуванні хімічних зв'язків. Натомість $2s, 2p_x, 2p_y$ орбіталі гібридизуються і утворюють у площині xy три нові sp^2 орбіталі, кожна з яких містить один електрон. Ці орбіталі зорієнтовані вздовж ліній, що виходять з ядра і розташовані під кутом 120 градусів одна від одної. Саме ці орбі-

талі сусідніх атомів формують міцні σ -зв'язки, що зумовлюють гексагональний вигляд ґратки графена. Ці зв'язки визначають зокрема механічні властивості графену з його унікальною жорсткістю.

Проте лишається ще p_z орбіталь, ортогональна до площини атомів вуглецю. Такі орбіталі різних атомів формують π -зв'язки, які в графіті відповідають за слабкі Ван-дер-Ваальсові сили між площинами. На кожен p_z орбіталь припадає один електрон і, отже, в ізолюваному шарі графену на кожен вузол ґратки припадає цей самий один електрон. Такі системи називають напівзаповненими (бо взагалі в одному енергетичному стані можуть перебувати два електрони, які різняться спінами). Саме p_z орбіталі й зумовлюють дивовижні електронні властивості графену.

Кристалічна ґратка і зонний спектр

Кристалічна ґратка графену є площиною, щільно запакованою гексагональними комірками (рис.3). В елементарній комірці (її трансляцією на вектор $\vec{r}_A = m\vec{e}_1 + n\vec{e}_2$, де m і n — цілі числа, можна вибудувати всю ґратку) містяться два атоми, позначені на рис. 3 як А і В. Відстань між найближчими атомами в шестикутнику $a_0 = 0,142$ нм. Як неважко бачити, стала ґратки при цьому дорівнює $a = \sqrt{3}a_0 = 0,246$ нм.

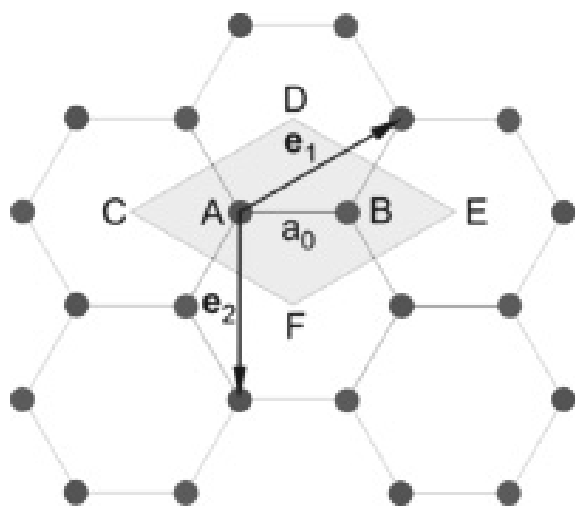


Рис. 3. Кристалічна ґратка графену. Заштриховано елементарну комірку.

Оскільки елементарна комірка графену містить два атоми, енергетичний спектр, формований π -орбіталями, включає дві зони: валентну

(при нижчих енергіях) і зону провідності (при вищих енергіях). Оскільки графен є напівзаповненою системою, валентна зона при нульовій температурі повністю заповнена електронами, а зона провідності — повністю вільна.

Електронні властивості графену (як і кожного іншого напівметалу чи напівпровідника) визначаються виглядом енергетичного спектру в околі краю зони провідності і валентної зони. Задачу про електронний спектр графену фактично розв'язав задовго до отримання самого графену П.Воллес, розглядаючи графіт [7] і почавши вивчення саме з окремих атомних площин вуглецю. Він показав: взаємодія електронів з π -орбіталями з гексагональною ґраткою призводить до вельми незвичайного з погляду інших твердих тіл енергетичного спектру, який зображено на рис. 4.

По-перше, валентна зона і зона провідності дотикаються в двох точках зони Бріллюена (їх називають Діраківськими точками). Такий зонний спектр не має щілини заборонених енергій, і цим з певного погляду нагадує давно відомий безщілинний напівпровідник типу HgTe.

Проте найцікавішим результатом П.Воллеса став сам вигляд залежності енергії носіїв E від модулю двовимірного імпульсу, відрахованого від Діраківської точки, p , в околі цієї точки. Виявилось, що така залежність має конусоподібний лінійний вигляд:

$$E = \pm v_F p \quad (1).$$

Тут знак “+” відповідає зоні провідності, а знак “—” — валентній зоні; а чисельне значення коефіцієнта пропорційності (його прийнято називати швидкістю Фермі) дуже велике: $v_F = 10^6$ м/с, що всього в 300 разів менше від значення швидкості світла c !

Нагадаємо: в усіх “звичайних” металах і напівпровідниках зонний спектр біля краю зони має квадратичний вигляд:

$$E_i = E_i^0 \pm \frac{p^2}{2m_i} \quad (2).$$

Тут E_i^0 — енергія екстремуму відповідної зони, m_i — ефективна маса носіїв (для різних зон вона різна). Знак “+” так само відповідає зоні провідності, а знак “—” — валентній зоні. Важливо те, що квадратичний спектр (2) є наслідком розв'язання рівняння Шредінгера для енергій біля краю відповідної зони в твердому тілі, яке має трансляційну симетрію.

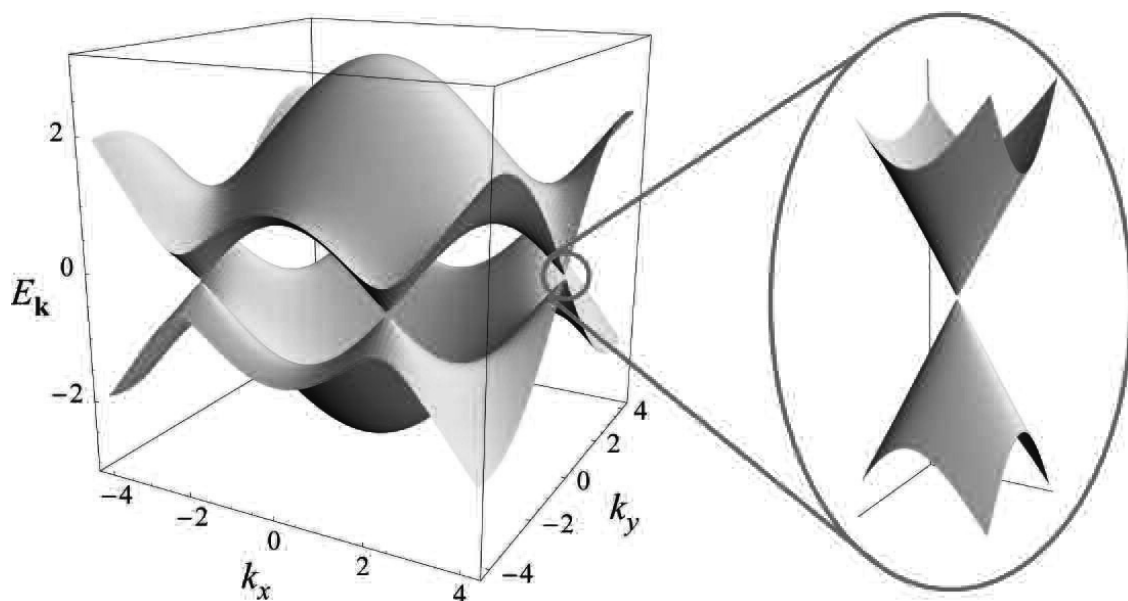


Рис. 4. Зонна структура графену. На врізці — конічний лінійний спектр носіїв в околі однієї з точок Дірака.

Натомість лінійний спектр (1) характерний для ультрарелятивістських частинок (фотонів, нейтрино). Ці частинки позбавлені маси спокою. Виявляється, що електрони і дірки в графені теж мають “нульову” ефективну масу.

Часом говорять, що рівняння Шредінгера в графені “не працює”. Це, звісно, не так. Повна система описується саме рівнянням Шредінгера, яке включає кінетичну енергію π -електронів і періодичний потенціал атомів вуглецю, “організованих” у гексагональну ґратку. Таке рівняння описує спектр при всіх значеннях енергій (а не лише поблизу особливих Діраківських точок, див. рис.4). Проте можна строго показати (див.[8]), що в околі точок Дірака спектр задається двовимірним рівнянням Дірака з нульовою ефективною масою, розв’язком якого є (1). Таким чином відбувається дивовижний перехід від звичайних для фізики конденсованого середовища електронів, які взаємодіють з періодичним потенціалом ґратки і мають скінченну ефективну масу, до вільних Діраківських ферміонів з нульовою ефективною масою, які рухаються зі швидкістю Фермі v_F — фактично з перенормованою на $1/300$ швидкістю світла!

Властивості електронного газу в графені

Звичайно, не всі дивовижні властивості графена визначаються лінійним виглядом зонного спектру поблизу точок Дірака. Вже згадувана надвисока, у 200 разів вища, ніж у сталі, жор-

сткість є наслідком великої міцності σ -зв’язків у площині xy . Ними ж визначається і висока хімічна стабільність графену.

Проте вже перша присвячена вимірам польових ефектів у графені [1] показала й низку інших незвичайних властивостей. Виявляється, у графені можуть спостерігатися дуже великі густини струмів. Аж до субмікронних розмірів транспорт у графені має балістичний характер (носії рухаються без розсіювання і мають дуже високу рухливість). Провідність графену може мати як електронний, так і дірковий характер.

Ця обставина є наслідком вигляду зонного спектру графену, описуваного рівнянням (1). Прикладаючи до затвору (шару кремнію під підкладкою з діелектрика) напругу різної полярності, можемо зміщувати рівень Фермі (який без напруги проходить через точку Дірака). Якщо на затворі “плюс”, рівень Фермі розташований вище від точки Дірака, і маємо електронну провідність, якщо “мінус”, і рівень Фермі зміщується нижче — діркову. Зміну типу провідності легко виявити, вимірюючи знак ефекту Холла.

Перші вимірювання на графені, нанесеному на підкладку діелектрика, давали значення рухливості $\mu \sim 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Такі значення зумовлені розсіюванням носіїв на коливаннях атомів (оптичних фононах) підкладки. Згодом, протравивши в шарі діелектрику яму завглибшки в 150 нм, вдалося отримати над нею “підвішену” плівку графену (стабільність її зумовлена тим,

що реальний графен не ідеальний: як показують картинки, отримані з допомогою атомного силового мікроскопу, його поверхня “збрижена” рельєфом з лінійними розмірами порядку 10 нм і висотою порядку 1 нм). Провідність у такому “підвішеному” графені суттєво вища — адже тут носії розсіюються тільки на дефектах самого графену. Цими дефектами можуть бути як неідеальності ґратки (поодинокі п’яти-, або семикутники, включені в масив шестикутників), так і коливання атомів ґратки (власні акустичні фонони графену). В разі, якщо вдасться виготовити “майже ідеальну” плівку, де залишиться лишень слабе розсіювання на власних акустичних фононах (якого уникнути принципово не можна), теоретична верхня межа рухливості становитиме $2 \times 10^6 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Отже, графен проводитиме краще, ніж срібло — найкращий провідник при кімнатній температурі.

Ще однією видатною рисою графену є наявність у нього мінімальної провідності. Здавалося б, коли напруги на затворі немає, то рівень Фермі проходить точно крізь точку Дірака, й жодної провідності бути не мусить, бо всі стани валентної зони заповнені, а всі стани зони провідності — вільні. Однак реально графен завжди виявляє мінімальну провідність порядку $4e^2/h$. Природа цієї мінімальної провідності очевидно пов’язана з неідеальностями реального графену, проте точну теорію цього явища досі не побудовано.

У великих магнітних полях у графені спостерігається незвичайний (англ. *unconventional*) квантовий ефект Холла, при якому квантування холлівської провідності визначається співвідношенням:

$$\sigma_{xy} = \pm \frac{4e^2}{h} \left(n + \frac{1}{2}\right); n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Тут e — заряд електрона, h — стала Планка. Нагадаємо, що формула для звичайного цілочисельного квантового ефекту Холла (за його відкриття Клаус фон Клітцинґ отримав Нобелівську премію з фізики 1985 року — адже людство отримало високоточний квантовий еталон опору, до якого входять лише дві світові константи e та h !) для площин кремнію, де рівні Ландау чотириразово вироджені за енергією, відрізняється від (3) відсутністю доданку $1/2$ в дужках.

Ціле число n і у випадку звичайного, і у випадку незвичайного квантового ефекту Холла

показує, носії зі скількох саме заповнених рівнів Ландау, на які квантується в сильному магнітному полі електронний спектр, беруть участь у перенесенні струму (якщо рівень Фермі знаходиться між рівнями Ландау, то на залежності σ_{xy} від інтенсивності магнітного поля спостерігається плато, висота якого визначається (3)). Множник “4” є наслідком виродження рівнів Ландау: двічі за спіном, ще двічі за двома точками Дірака (у графені) чи за двома еквівалентними долинами (у площині кремнію {001}). Натомість доданок $1/2$ у дужках є наслідком Діраківської природи електронів з нульовою ефективною масою у графені.

Ще однією видатною рисою графену є те, що цей моноатомний шар вуглецю можна побачити неозброєним оком — бо він поглинає близько 2,3 % випромінювання, що падає на нього! У роботі [10] було показано (і теоретично, і експериментально), що коефіцієнт поглинання одноатомного шару графену A визначається виключно сталою тонкою структурою α (і не залежить від характеристик самого графену, як-от концентрації носіїв у ньому, сталої його ґратки тощо):

$$A = \pi\alpha = \frac{\pi e^2}{\hbar c} \approx 0,023 \quad (4)$$

При цьому коефіцієнт пропускання графену становить $T = 1 - A \approx 0,98$.

Два шари графену поглинають удвічі більше світла, три — втричі і т.д. Це й було експериментально підтверджено в [10].

Варто відзначити: у фізиці конденсованого середовища вкрай нечасто трапляється ситуація, коли певна характеристика середовища залежить не від інших характеристик цього ж середовища, а від фундаментальних констант. Є лише нечисленні винятки на кшталт кванту провідності в квантовому ефекті Холла чи кванту магнітного потоку через коло надпровідника.

В цілому ж висока прозорість графену (98 %) разом із його металічною поведінкою відкриває можливості для його використання в промисловості фотовольтаїчних сонячних елементів чи дисплеїв як прозорого металевого електроду (звичайні метали непрозорі).

Нарешті, варто зупинитися на ще одному вартовому уваги явищі у графені, а саме на парадоксі Клейна. Ми вже говорили, що носії у графені поблизу точок Дірака описуються

тим самим гамільтоніаном Дірака, що описує й ультрарелятивістські частинки, наприклад, нейтрино. Для нейтрино існує величина, що називається спіральністю (або ж хіральністю) — проекція спіну на напрям руху, і ця величина зберігається. Хіральність має зберігатися і в графені.

Збереження хіральності призводить у квантовій механіці до явища, що називається парадоксом Клейна — ультрарелятивістській частинці легше подолати вищий потенціальний бар'єр! У графені парадокс Клейна виявляється в тому, що діраківський електрон проходить з імовірністю одиниця будь-який потенціальний бар'єр (за умови нормального падіння; при падінні під кутом існує ненульова ймовірність відбиття) [11]. Отже, носії в графені важко локалізувати — що в свою чергу є фактором підвищення їхньої рухливості.

Можливі застосування

Через свої унікальні фізичні характеристики графен може стати ідеальним матеріалом для газових сенсорів. Очевидною перевагою графену в сенсорикі є те, що весь його об'єм відкритий навколишньому середовищу. У роботі [12] було показано, що приєднання навіть однієї молекули газу до поверхні мініатюрного сенсора мікронного розміру призводить до суттєвої зміни його електричного опору. Фізика явища полягає в тому, що різні молекули, приєднавшись до графенової поверхні, привносять до зонного спектру резонансні рівні (донорні або акцепторні; молекула NO_2 є, наприклад, яскравим акцептором), на яких носії розсіюються, — це було теоретично показано в [13]. Невеличке підігрівання звільнює поверхню від адсорбованої молекули, і сенсор готовий до поновного використання.

Ще один альтернативний фізичний механізм створення сенсорів на основі графену було запропоновано в [14]. Було використано те, що, завдяки своїй унікальній жорсткості, підвішений над спеціально протравленою у підкладці ямою графен є прекрасним резонатором, де генеруються механічні коливання МГц діапазону. Ці коливання збуджувалися електричними чи оптичними методами, і реєструвалися оптичними інтерферометричними методами. При цьому частота коливань відчутно змінювалася при зміні маси чи заряду поверхні. Було по-

казано, що відносно заряду чутливість такого сенсора становить $8 \cdot 10^{-4}$ електрона на корінь квадратний з одного герца.

На сьогодні на основі графену вже створено різні сенсори, у т.ч. біосенсори для клітин і молекул ДНК [15].

Проте створення на основі графену польового транзистора наражається на труднощі принципового характеру. Відсутність у графені забороненої зони призводить до того, що при будь-яких прикладених до затвору напругах складно домогтися суттєвої зміни опору, необхідної для створення двох станів: провідного і непровідного, на яких ґрунтується двійкова логіка. Отже, проблемою є створити в графені заборонену зону такої ширини, щоб термічно збуджені носії при робочій температурі давали малий вклад у провідність.

Один із можливих способів полягає в створенні графенових нанострічок, де квантово-розмірні ефекти дозволяють отримати заборонену зону потрібної ширини (ширині стрічки в 20 нм відповідає заборонена зона, еквівалентна кімнатній температурі в енергетичних одиницях) [16]. Інший можливий підхід полягає в гідрогенізації поверхні графену й утворенні так званого графану, в якому існує заборонена зона [17]. Перевагою підходу є те, що нанесення атомів водню в строго визначених місцях дозволяє отримати чергування областей з забороненою зоною і без неї, і може стати прообразом промислових методів виготовлення нової графенової електроніки.

У лютому 2010 року фахівці IBM повідомили про створення польового транзистора на основі графену зі швидкодією в 100 ГГц, що перевищує швидкодію кремнієвого транзистора [18].

Іншими перспективними сферами застосування графену можуть стати створення електродів для іоністорів (суперконденсаторів) для використання їх як перезаряджуваних джерел струму, створення світлодіодів, а також спінтроніка.

При цьому практичне застосування графену наражається на низку труднощів. Так, при розгляді роботи різних пристроїв на основі графену переважно розглядався лінійний відгук носіїв у фононному термостаті з температурою T [8]. Але саме та слабкість взаємодії носіїв з акустичними фононами, яка дозволяє отримати в “підвішеному” графені рекордно високі рухливості, призводить водночас до того, що

зовнішній вплив може легко збурити рівновагу в електрон-дірковій системі.

Зокрема, коли зразок не ізольовано від зовнішнього термічного випромінювання з температурою $T_r \neq T$, істотною є взаємодія носіїв з додатковим термостатом фотонів. Така взаємодія може бути достатньо ефективною, бо міжзонним переходам відповідає матричний елемент зі швидкістю $v_F = 10^8$ см/с, що характеризує лінійний нейтриноподібний спектр носіїв. Тому графен вельми чутливий до термічної радіації, яка може суттєво змінити концентрацію носіїв і провідність.

У [19] було показано, що в певному інтервалі енергій функція розподілу носіїв у графені в режимі конкуренції зона-зонних переходів, розсіяння носіїв на акустичних фононах та один на одному, може бути більшою від 1/2, що відповідає інверсній заселеності електрон-діркових пар. Це в свою чергу може спричинити режим негативного міжзонного поглинання, а також призвести до нерівноважного відгуку (при розрахунку концентрації, енергетичної густини й провідності).

Як висновок, всі вимірювання транспортних характеристик у власному графені повинні проводитися з контролем дотримання співвідношення $T_r = T$. В іншому випадку носії стають нерівноважними й результати можуть залежати від неконтрольованих зовнішніх чинників, які визначають T_r і T . Розглядаючи можливості застосування графена, слід також враховувати можливість неоднаковості температур фононного й фотонного термостатів.

Висновки

Сьогодні важко з певністю стверджувати, чи реалізуються оптимістичні прогнози щодо появи протягом ближчих двох років побутової електроніки на основі графену. Але вже можна говорити, що упродовж останніх років сформувалося нове інтердисциплінарне поле досліджень — фізика графену. Вона вже дала низку блискучих фундаментальних результатів, і тисячі людей в усьому світі працюють над можливими застосуваннями моноатомного вуглецю в електроніці.

Творець цієї фізики графену, Андрій Гейм, був удостоєний 2007 року престижної медалі Мотта за “відкриття нового класу матеріалів”, у 2008 році його (разом з Костянтином Новосьо-

ловим) було вшановано Єврофізичною премією, у 2008 і 2009 роках він розглядався як один з найреальніших кандидатів на Нобелівську премію з фізики.

Чи призведе фізика графену до революційних змін в електроніці, а чи лишиться полем академічних досліджень, нехай і дуже цікавих (як це сталося спершу з “токамаками” й керованим термоядерним синтезом, а потім з високотемпературною надпровідністю) — покаже найближче майбутнє.

Подяки

Автор вдячний Ф. Т. Васькові, який залучив його до фізики графену, та В. Г. Литовченку, який звернув увагу автора на елегантно написаний і орієнтований на широке коло фізиків огляд [3], що й спонукав написати щось подібне українською мовою.

Література

1. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., and Firsov A. A. “Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films”, *Science* **306**, 666 (2004).
2. Geim A. “Graphene: Status and Prospects”. *Science* **324**, 1530 (2009).
3. Peres N. M. R., “Graphene, new physics in two dimensions”, *Europhysics News* **40**, 17 (2009).
4. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г. “Наноструктуры: физика, технология, применения”. Новосибирск: НГТУ (2008).
5. Sukang Bae *et al.*, “Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes”, *Nature Nanotechnology*, Published online: 20 June 2010.
6. Shioyama H. “Cleavage of graphite to graphene” *J. Mat. Sci. Lett.* **20**, 499 (2001)
7. Wallace P. R. “The Band Theory of Graphite”, *Phys. Rev.* **71**, 622 (1947).
8. Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S., and Geim A. K. “The electronic properties of graphene”, *Review of Modern Physics* **81**, 109 (2009).
9. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Katsnelson M. I., Grigorieva I. V., Dubonos S. V., and Firsov A. A. “Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene”, *Nature* **438**, 197 (2005).
10. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Brooth T. J., Stauber T., Peres N. M. R., and Geim A. K. “Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene”. *Science* **320**, 5881 (2008).

11. Katsnelson M. I., Novoselov K. S., Geim A. K., "Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene" *Nature Physics* **2**, 620 (2006).
12. Schedin F., Geim A. K., Morozov S. V., Hill E. W., Blake P., Katsnelson M. I., Novoselov K. S. "Detection of Individual Gas Molecules Absorbed on Graphene" *Nature Materials* **6**, 652 (2007).
13. Wehling T. O., Novoselov K. S., Morozov S. V., Vdovin E. E., Katsnelson M. I., Geim A. K., and Lichtenstein A. I. "Molecular Doping of Graphene" *Nano Lett.* **8**, 173 (2008).
14. Bunch J. S. *et al.*, "Electromechanical Resonators from Graphene Sheets" *Science* **315**, 490 (2007).
15. Mohanty Nihar, Vikas Berry. "Graphene-based Single-Bacterium Resolution Biodevice and DNA-Transistor — Interfacing Graphene-Derivatives with Nano and Micro Scale Biocomponents". *Nano Letters* **8**, 4469 (2008).
16. Chen Zh., Lin Y. M., Rooks M. J., Avouris P. "Graphene Nano-Ribbon Electronics" *Physica E* **40**, 228 (2007).
17. D. C. Elias *et al.* "Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane". *Science* **323**, 5914 (2009).
18. Bourzac Katherine "Graphene Transistors that Can Work at Blistering Speeds". *MIT Technology Review* (2010—02—05).
19. Romanets P. N., Vasko F. T., and Strikha M. V. "Thermal-radiation-induced nonequilibrium carriers in intrinsic graphere" *Phys. Rev. B.* **79**, 033406 (2009).